



TUGAS AKHIR – SS 141501

**PENENTUAN WAKTU OPTIMUM PERBAIKAN
MESIN KETEL MENGGUNAKAN METODE *POWER
LAW PROCESS* DI PT. PG X SIDOARJO**

**IFA FAULINA
NRP 1315 105 033**

**Dosen Pembimbing
Dr. Muhammad Mashuri, MT
Drs. Haryono, M.SIE**

**PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN STATISTIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**



TUGAS AKHIR – SS 141501

**PENENTUAN WAKTU OPTIMUM PERBAIKAN
MESIN KETEL MENGGUNAKAN METODE *POWER
LAW PROCESS* DI PT. PG X SIDOARJO**

**IFA FAULINA
NRP 1315 105 033**

**Dosen Pembimbing
Dr. Muhammad Mashuri, MT
Drs. Haryono, M.SIE**

**PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN STATISTIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**



FINALPROJECT – SS141501

**OPTIMUM REPAIR TIME DETERMINATION OF
BOILER MACHINE USING POWER LAW PROCESS
METHOD IN PT. PG X SIDOARJO**

**IFA FAULINA
NRP 1315 105 033**

**Supervisor
Dr. Muhammad Mashuri, MT
Drs. Haryono, M.SIE**

**UNDERGRADUATE PROGRAM
DEPARTMENT OF STATISTICS
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**

LEMBAR PENGESAHAN

PENENTUAN WAKTU OPTIMUM PERBAIKAN MESIN KETEL MENGGUNAKAN METODE *POWER LAW PROCESS* DI PT. PG X SIDOARJO

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Sains
pada
Program Studi Sarjana Departemen Statistika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Ifa Faulina

NRP. 1315105 033

Disetujui oleh Pembimbing:

Dr. Muhammad Mashuri, MT

NIP. 19620408 198701 1 001

Drs.Haryono, MSIE.

NIP. 19520919 197901 1 001

(*Mashuri*)

Haryono



Mengetahui,
Kepala Departemen

Dr. Suhartono

NIP. 19710929 199512 1 001

SURABAYA, JULI 2017

PENENTUAN WAKTU OPTIMUM PERBAIKAN MESIN KETEL MENGGUNAKAN METODE *POWER LAW* PROCESS DI PT. PG X SIDOARJO

Nama Mahasiswa : Ifa Faulina
NRP : 1315 105 033
Departemen : Statistika
Dosen Pembimbing I : Dr. Muhammad Mashuri, MT
Dosen Pembimbing II : Drs. Haryono, M.SIE

Abstrak

Maintenance atau perawatan pada suatu mesin dilakukan dengan tujuan agar peralatan memiliki kondisi yang sama seperti keadaan awalnya dan meminimumkan kerugian secara ekonomi bagi perusahaan. Sehingga, frekuensi perawatan yang tepat sangat diperlukan. PT. PG X Sidoarjo saat ini memiliki dua mesin ketel, yaitu Cheng Chen Machinery (KCC) dan Faive Cail Babcock (FCB). Kedua ketel bersifat independen dengan fungsi yang sama, yaitu sebagai mesin penggerak mesin yang digunakan untuk memproduksi gula. Namun kedua mesin memiliki perbedaan dalam obyek yang digerakkan. Penelitian ini bertujuan menentukan waktu perbaikan mesin ketel yang tepat dan meminimumkan biaya akibat kerusakan dengan menggunakan metode Power Law Process. Hasil analisis menunjukkan bahwa kerusakan pada kedua ketel telah mengikuti model Non Homogeneous Poisson Process (NHPP) atau memiliki trend laju kerusakan yang meningkat. Perhitungan waktu perawatan pada mesin ketel KCC sebaiknya perawatan dilakukan jika mesin telah digunakan selama 24 jam operasi atau setelah mesin mengalami kerusakan yang pertama tergantung mana yang terlebih dahulu terjadi dengan biaya minimum sebesar Rp 55.633 per satu jam operasi. Sedangkan, mesin FCB sebaiknya dilakukan perawatan jika telah digunakan selama 40 jam operasi atau setelah mesin mengalami kerusakan yang pertama tergantung mana dulu yang terjadi dengan estimasi biaya Rp. 33.105 per jam operasi.

Kata Kunci : *Maintenance, Mesin Ketel, Non Homogeneous Poisson Process, Power Law Process*

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

OPTIMUM REPAIR TIME DETERMINATION OF BOILER MACHINE USING POWER LAW PROCESS METHOD IN PT. PG X SIDOARJO

Student Name : Ifa Faulina
NRP : 1315 105 033
Department : Statistics
Supervisor I :Dr. Muhammad Mashuri, MT
Supervisor II :Drs. Haryono, M.SIE

Abstract

Maintenance on a machine is done with the aim that the equipment has the same conditions as the initial state and minimize the economic losses for the company. Thus, the right frequency of care is necessary. PT. PG X Sidoarjo currently has two boiler machines, that is Cheng Chen Machinery (KCC) and Faive Cail Babcock (FCB). Both boilers are independent with the same function, as a machine driving machine that used to produce sugar. But both machines have differences in the object being driven. This study aims to determine the proper timing of boiler repair and minimize the cost of damage by using Power Law Process method. The results show that damage to both boilers has followed the Non Homogeneous Poisson Process (NHPP) model or has an increasing trend of damage. Estimation of maintenance time on the KCC boiler machine should be made if the machine has been used for 24 hours operation or after the machine suffered the first damage depending on which first occurs with a minimum charge of Rp 55,633 per one hour operation. Meanwhile, the FCB machine should be treated if it has been used for 40 hours of operation or after the machine suffered the first damage depending where it used to happen with the estimated cost of Rp. 33.105 per hour of operation.

Keywords: *Boiler Machine, Maintenance, Non Homogeneous Poisson Process, Power Law Process*

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Penentuan Waktu Optimum Perbaikan Mesin Ketel Menggunakan Metode Power Law Process di PT. PG X Sidoarjo**” dengan baik dan sesuai harapan. Laporan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, untuk itu kami ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Keluarga yang penulis sayangi Alm. Ayah Tukiban , Ibu Atim, Mbak Nita, Mas Budi, Mas Efan, dan Mbak Ika serta seluruh keluarga besar penulis yang telah memberikan kasih sayang, doa, dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan hasil Tugas Akhir ini.
2. Dr. Muhammad Mashuri, MT dan Drs. Haryono, M.SIE selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang selama ini telah meluangkan waktu untuk membimbing dan memberi saran serta membantu penulis selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Dr. Agus Suharsono, MS dan Pratnya Paramitha Oktaviana, S.Si, M.Si selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu untuk memberikan masukan guna perbaikan pada Tugas Akhir ini.
4. Dr. Suhartono selaku Ketua Departemen dan Dr. Sutikno, S.Si, M.Si selaku Kepala Program Studi S1 yang memberikan fasilitas dan arahan guna kelancaran Tugas Akhir ini.
5. Imam Safawi, S.Si, M.Si selaku dosen wali yang membantu dan meluangkan waktu penulis dalam proses perwalian selama perkuliahan.
6. Seluruh Karyawan di PT. PG X Sidoarjo khususnya divisi fabrikasi yang telah mengizinkan penulis menggunakan data kerusakan mesin ketel sebagai bahan Tugas Akhir ini.
7. Seluruh karyawan Administrasi Departemen Statistika ITS yang telah membantu dalam proses administrasi Tugas Akhir ini

8. Sahabat-sahabat penulis yang setia menghibur dan memotivasi penulis sehingga penulis terus memiliki semangat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
9. Teman-teman Lintas Jalur 2015 yang telah banyak membantu penulis dalam hal perkuliahan dan penulisan laporan Tugas Akhir ini

Penulis menyadari laporan Tugas akhir ini masih belum sempurna sehingga saran atau kritik dari pembaca sangat berguna bagi penyempurnaan laporan Tugas Akhir ini.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat	4
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Stochastic Point Process</i>	5
2.1.1 <i>Renewal Process</i>	5
2.1.2 Proses Perbaikan Minimal	5
2.2 <i>Poisson Process</i>	6
2.2.1 <i>Homogeneous Poisson Processes (HPP)</i>	6
2.2.2 <i>Non-Homogeneous Poisson Processes (NHPP)</i>	6
2.3 <i>Power Law Process</i>	8
2.4 <i>Failure Truncated data dan Time Truncated Data</i>	9
2.5 <i>Maximum Likelihood Estimation (MLE) Time</i> <i>Truncated Data Masing-Masing Mesin</i>	9
2.6 <i>Goodness of Fit Test</i>	11
2.7 Pengujian Persamaan Parameter dalam <i>Power Law</i> <i>Process</i>	12
2.8 Membentuk NHPP Model dengan <i>Power Law</i> <i>Process</i>	13
2.9 <i>Replacement Model</i>	15

2.10 Proses Produksi pada PT. PG X Sidoarjo	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Sumber Data	19
3.2 Variabel Penelitian.....	19
3.3 Langkah Analisis	19
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	
4.1 Karakteristik <i>Time Truncated Data</i> Mesin KCC dan FCB ..	23
4.2 Estimasi Parameter Masing-Masing Mesin Ketel	25
4.3 <i>Goodness of Fit Test</i>	26
4.4 Pengujian Persamaan Parameter dalam <i>Power Law</i> <i>Process</i>	27
4.5. Estimasi Parameter Gabungan <i>Nonidentical System</i>	28
4.6 <i>Replacement Model</i>	30
4.6.1 Nilai c_f dan c_p	31
4.6.2 Perhitungan Estimasi Biaya	32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	35
5.2 Saran	35
DAFTAR PUSTAKA	37
LAMPIRAN	39
BIODATA PENULIS	49

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Diagram Proses Produksi	17
Gambar 2.2 Mesin Ketel.....	18
Gambar 3.1 Diagram Alir	21
Gambar 4.1 Jumlah Kerusakan Mesin KCC (a) dan Mesin FCB (b).....	24
Gambar 4.2 <i>Rate of Occurrence of Failure</i> (ROCOF) Mesin KCC (a) dan Mesin FCB (b)	30
Gambar 4.3 Ekspektasi Optimasi Biaya Perawatan Mesin Ketel KCC	33
Gambar 4.4 Ekspektasi Optimasi Biaya Perawatan Mesin Ketel FCB.....	34

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Struktur Data	19
Tabel 4.1 Karakteristik <i>Time Truncated</i> Data Usia Pakai	23
Tabel 4.2 Statistik Uji <i>Cramer-von Mises Test</i>	26
Tabel 4.3 Estimasi Parameter Gabungan dengan <i>Nonidentical System</i>	28
Tabel 4.4 <i>Rate of Occurrence of Failure</i> (ROCOF) Mesin Ketel KCC dan FCB	29
Tabel 4.5 Rincian <i>Cost of Failure</i>	31
Tabel 4.6 Ekspektasi Biaya Mesin Ketel KCC	33
Tabel 4.7 Ekspektasi Biaya Mesin Ketel FCB.....	34

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1A. Data <i>Lifetime</i> Mesin Ketel KCC.....	39
Lampiran 1B. Data <i>Lifetime</i> Mesin Ketel FCB	39
Lampiran 2A. <i>Goodness of Fit Test</i>	39
Lampiran 3A. Estimasi Parameter Gabungan <i>Nonidentical System</i>	41
Lampiran 4A. Perhitungan Nilai ROCOF Mesin KCC.....	42
Lampiran 4B. Perhitungan Nilai ROCOF Mesin FCB.....	43
Lampiran 5A. Rincian Biaya Perawatan (C_p) dan Biaya Akibat Kerusakan (C_f).....	44
Lampiran 6A. Syntax MATLAB Optimasi Biaya	45
Lampiran 6B. Perhitungan Optimasi Biaya Mesin Ketel KCC	46
Lampiran 6C. Perhitungan Optimasi Biaya Mesin Ketel FCB.....	47
Lampiran 7A. Surat Pernyataan Izin Publikasi.....	48

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mesin adalah komponen pokok dalam suatu perusahaan karena mesin merupakan alat mekanik atau elektrik yang mengirim atau mengubah energi untuk melakukan suatu pekerjaan atau sebagai alat bantu mempermudah pekerjaan manusia. Proses produksi akan sangat bergantung pada keadaan suatu mesin. Mesin dapat dikatakan baik jika mampu menghasilkan produk dengan kualitas baik dan dapat mencapai target produksi. Keandalan mesin yang tidak baik akan mengganggu kelancaran proses produksi. Mesin akan sering mengalami kerusakan karena tidak diterapkannya metode perawatan yang tepat seiring biaya yang ditimbulkannya. Sehingga, mesin perlu dilakukan pengontrolan agar dapat dilakukan *maintenance*.

Maintenance atau pemeliharaan merupakan suatu kegiatan yang dilakukan secara berulang-ulang dengan tujuan agar peralatan memiliki kondisi yang sama seperti keadaan awalnya. Kerusakan suatu mesin akan berdampak kerugian secara ekonomi bagi perusahaan. Masalah lain pun timbul dimana perawatan yang terlalu sering dilakukan akan menimbulkan biaya yang besar dan perawatan yang jarang dilakukan akan sering terjadi kerusakan serta biaya yang timbul akan lebih besar. Sehingga perhitungan yang tepat terhadap frekuensi perawatan sangat diperlukan guna meminimumkan biaya dan menjaga kondisi mesin tetap baik.

PT. PG X di Sidoarjo merupakan pabrik gula yang memproduksi gula SHS (*Superior Hooft Suiker*) atau GKP (Gula Kristal Putih) tipe 1A sebagai produk utama. Selain produk tersebut ada beberapa hasil sampingan, salah satunya berupa tetes yang dijual ke beberapa perusahaan. Saat ini PT. PG X memiliki 7 stasiun produksi yang terdiri dari stasiun gilingan, stasiun ketel, stasiun pemurnian, stasiun penguapan, stasiun masakan, stasiun puteran, dan stasiun penyelesaian. Proses produksi di PT. PG X

berawal pada stasiun penggilingan yang memiliki sistem seri yang menghasilkan nira mentah dan ampas tebu. Selanjutnya, nira mentah akan diproses pada stasiun pemurnian, stasiun penguapan, stasiun masakan, stasiun puteran, dan terakhir pada stasiun penyelesaian. Sedangkan ampas akan masuk ke stasiun ketel sebagai bahan bakar.

Pada tahun 2016, target rata-rata produksi PT. PG X sebesar 2700 ton per hari. Namun, hingga akhir musim giling tahun 2016 PT. PG X hanya mampu memproduksi sebanyak 1837 ton per hari. Hal tersebut diakibatkan adanya hambatan kerusakan pada mesin produksi sehingga mengharuskan berhentinya proses produksi. Mesin giling tebu dapat berjalan dengan baik jika mesin ketel berfungsi dengan baik pula. Namun, jika mesin ketel mengalami kerusakan, maka semua proses produksi tidak dapat berjalan. Oleh sebab itu stasiun ketel disebut sebagai jantungnya proses produksi karena mesin ketel berfungsi sebagai alat penggerak mesin giling tebu dan generator berupa uap panas dengan bahan bakar ampas tebu yang menghasilkan tenaga listrik.

Pada stasiun ketel terdapat dua mesin ketel utama yaitu mesin ketel *Cheng Chen Machinery* (KCC) dan mesin ketel *Faive Cail Babcock* (FCB). Kedua ketel berjalan secara independen namun memiliki fungsi dan kapasitas yang sama. Artinya, mesin ketel satu tidak mempengaruhi jalannya mesin ketel yang lain, namun fungsinya tetap sama yaitu sebagai alat penggerak. Namun, pada objek yang digerakkan oleh kedua mesin tersebut berbeda. Dimana mesin KCC menggerakkan generator dan mesin ketel FCB sebagai ketel penggerak mesin giling. Permasalahan yang terjadi pada mesin ketel adalah sering mengalami kerusakan yang tidak menentu pada saat musim giling padahal pihak perusahaan telah menentukan waktu perawatan atau *maintenance* pada saat tidak musim giling. Hal tersebut mengakibatkan berhentinya fungsi mesin ketel dan mengakibatkan membengkaknya biaya serta tidak tercapainya target hasil produksi. Sehingga, perlu diketahui waktu yang optimal untuk

melakukan perbaikan pada kedua mesin ketel agar dapat meminimumkan biaya akibat kerusakan.

Penelitian terdahulu mengenai *lifetime engine bus* yang dilakukan oleh Leung dan Cheng (2000) menggunakan metode *power law process* dengan kesimpulan bahwa *engine bus* harus diganti pada kerusakan pertama atau pada selang waktu 53,03 hingga 60,61 bulan tergantung mana yang terlebih dahulu yang terjadi. Penelitian lain yang menggunakan metode *power law process* juga dilakukan oleh Tyas (2016) dengan kesimpulan bahwa tindakan perbaikan terhadap komponen *Heat Exchanger* sebaiknya dilakukan pada saat komponen telah beroperasi selama 8900 *flight hours* atau ketika terjadi kerusakan pertama sebelum mencapai waktu operasi 8900 *flight hours* dengan estimasi biaya yang minimum sebesar US\$0,1090 per *flight hours*. Penelitian lainnya yang menganalisis waktu perbaikan telah dilakukan oleh Permatasari (2016) dengan kesimpulan bahwa komponen *Air Cycle Machine* (ACM) pesawat CRJ-1000 akan diganti setelah terjadi kerusakan ke-4 dengan estimasi rata-rata biaya penggantian jangka panjang sebesar US\$6961.

Pada penelitian ini dilakukan analisis pada data jam henti produksi gula pada mesin ketel di PT. PG X Sidoarjo pada saat musim giling tahun 2013 hingga 2016. Metode yang akan digunakan pada data tersebut yaitu *Power Law Process* atau model proses *Weibull*. Alasan menggunakan metode tersebut adanya laju kerusakan yang meningkat dan sifat dari distribusi *weibull* yang tidak *memory less*. Karena pada umumnya keadaan suatu mesin akan berkurang keandalannya seiring dengan meningkatnya lama beroperasi.

1.2 Rumusan Masalah

Kerusakan yang terjadi pada ketel dari tahun 2013 hingga 2016 masih sering terjadi walaupun selama tidak musim giling telah dilakukan perawatan. Hal tersebut akan menyebabkan proses produksi tidak berjalan secara optimal dan target hasil produksi perusahaan tidak tercapai . Usia dari mesin ketel yang

sangat tua dan peranan mesin ketel sebagai jantung proses produksi perusahaan yang menyebabkan semakin pentingnya pengawasan dan perawatan khusus terhadap mesin ketel. Oleh sebab itu, keandalan dari mesin ketel harus sangat diperhatikan agar dapat terus beroperasi dan meminimumkan biaya akibat kerusakan.

Berdasarkan keterangan pada paragraf sebelumnya, maka permasalahan yang akan dibahas pada penelitian tugas akhir ini adalah bagaimana menentukan waktu perawatan mesin ketel yang tepat dan meminimumkan biaya akibat kerusakan mesin ketel.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang didapatkan dalam penelitian ini adalah menentukan waktu optimum untuk melakukan perbaikan pada mesin ketel. Jika telah mendapat waktu yang optimum, maka akan dapat meminimumkan biaya akibat kerusakan di PT. PG X Sidoarjo.

1.4 Manfaat Penelitian

Harapanya penelitian ini dapat mampu memberikan informasi mengenai waktu perbaikan mesin ketel yang optimal sehingga dapat meminimumkan biaya perawatan maupun biaya perbaikan akibat kerusakan di PT. PG X Sidoarjo.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut

1. Data yang digunakan adalah data jam henti mesin ketel pada saat musim giling saja.
2. Objek penelitian yang digunakan adalah hanya pada dua mesin ketel tekanan menengah di PT. PG X Sidoarjo.
3. Penelitian ini diasumsikan bahwa mesin ketel berfungsi dengan baik setelah mendapatkan perawatan pada saat musim tidak giling.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Stochastic Point Process*

Random variabel dengan $N(t)$ adalah jumlah kejadian yang terjadi dari sebuah kegagalan pada interval waktu $(0, t)$. Proses dari $\{N(t), t \geq 0\}$ yang disebut *stochastic process* atau proses stokastik dengan realisasi suatu proses menghitung atau *counting process*. Misalnya, jika ingin diketahui jumlah kegagalan pada suatu mesin hingga waktu ke- t dengan t adalah waktu operasional mesin. Manfaatnya, untuk mengetahui hubungan dari suatu runtutan peristiwa atau proses kejadian yang bersifat tidak pasti (Hoyland and Rausand, 1994).

2.1.1 *Renewal Process*

Terdapat dua jenis komponen yaitu *repairable system* dan *non-repairable system*. *Repairable system* merupakan suatu komponen jika terjadi kerusakan, maka komponen tersebut dapat diperbaiki dengan beberapa proses perbaikan selain penggantian pada seluruh komponen. Sedangkan *non-repairable system* merupakan suatu komponen yang jika mengalami kerusakan, maka harus diganti dengan komponen yang baru atau tidak dapat diperbaiki atau dalam artian lain komponen tersebut akan lebih mahal jika diperbaiki daripada diganti dengan komponen baru (O'Connor, 2012).

Ketel di perusahaan gula sering disebut *renewal process*. *Renewal process* merupakan proses yang jika komponen rusak, maka komponen akan dikembalikan kepada kondisi seperti komponen yang baru (*as good as new condition*) setelah mengalami perbaikan (Hoyland and Rausand, 1994).

2.1.2 *Proses Perbaikan Minimal*

Minimal repair merupakan sistem yang gagal akan berfungsi kembali setelah perbaikan dilakukan dengan kondisi yang sama dan usia efektif yang sama seperti pada saat kegagalan terakhir. Asumsi dai *minimal repair* adalah dianggap bahwa waktu perbaikan sangat minimum. Jika ingin memperoleh model yang

fleksibel dalam suatu sistem kegagalan yang akan diperbaiki, maka hanya sebagian kecil proporsi dari unsur-unsur sistem yang akan diganti pada proses *repair*. Hal tersebut akan mendondiskan sistem sama seperti sebelum sistem mengalami kerusakan (Rigdon and Basu, 2000).

2.2 Poisson Process

Sebuah komponen yang memiliki tingkat kerusakan konstan (θ) atau rusak secara tiba-tiba dan secara langsung diperbaiki atau diganti ketika mengalami kerusakan. N adalah jumlah kejadian yang muncul dari sebuah kegagalan pada interval waktu kejadian yang muncul dari sebuah kegagalan pada interval waktu $(0, t)$, banyaknya kerusakan yang memiliki distribusi Poisson dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut (Rigdon and Basu, 2000).

$$p(x) = P(N = n) = \frac{e^{-\theta} (\theta)^n}{n!}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

Rata-rata jumlah kerusakan dan varians bernilai θ . Terdapat dua macam dari *poisson process* yaitu *Homogeneous Poisson Processes* (HPP) dan *Non-Homogeneous Poisson Processes* (NHPP).

2.2.1 Homogeneous Poisson Processes (HPP)

Homogeneous Poisson Processes (HPP) merupakan *poisson process* dengan fungsi intensitas konstan dengan waktu kedatangan bersifat independen dan berdistribusi eksponensial yang parameter *failure rate* bernilai θ (Hoyland and Rausand, 1994).

Guna menentukan probabilitas jumlah kegagalan oleh waktu ke- t , maka menggunakan persamaan seperti berikut.

$$P[N(t) = r] = \frac{\theta t^r}{r!} e^{-\theta t}, r = 0, 1, 2, \dots \quad (2.2)$$

2.2.2 Non-Homogeneous Poisson Processes (NHPP)

Non-Homogeneous Poisson Processes (NHPP) merupakan *poisson process* dengan intensitas tidak konstan dengan laju kerusakan berevolusi terhadap waktu. NHPP dapat diaplikasikan

untuk sistem dengan laju kerusakan menurun atau meningkat menggunakan metode statistika yang relevan dan mudah diaplikasikan. NHPP menggambarkan suatu proses kerusakan komponen dengan jumlah kumulatif hingga waktu ke- t . Proses hitung dari $\{N(t), t \geq 0\}$ dengan fungsi intensitas waktu $w(t)$ untuk $t \geq 0$ dikatakan memiliki proses Poisson dengan asumsi sebagai berikut (Crowder, Kimber, Smith, & Sweeting, 1991).

1. $N(0) = 0$
2. $\{N(t), t \geq 0\}$ dikatakan *independent increments*
3. $P(N(t + \Delta t) - N(t) \geq 2) = O(\Delta t)$, tidak akan terjadi lebih dari satu kejadian terhadap satu kegagalan di waktu yang sama
4. $P(N(t + \Delta t) - N(t) = 1) = w(t)\Delta t + O(\Delta t)$

NHPP biasa disebut dengan *weibull process* dikarenakan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) yang memiliki fungsi *failure rate* yang sama dengan distribusi weibull dengan parameter *shape* (β) dan parameter *scale* (θ). ROCOF merupakan estimasi dari nilai laju kerusakan suatu komponen. Jika suatu komponen *repairable* telah di observasi pada interval waktu $[0, t]$ dengan t dapat ditentukan interval waktunya (*time truncated case*) atau pada kegagalan terakhir (*failure truncated case*), maka ROCOF dapat diaplikasikan dengan melihat dari beberapa kali kegagalan yang terjadi. *Cumulative intensity* dari NHPP adalah sebagai berikut (Hoyland and Rausand, 1994).

$$W(t) = \int_0^t w(t) dt \quad (2.3)$$

Selanjutnya jika ingin menentukan probabilitas jumlah kegagalan pada interval waktu $[t_1, t_2]$, maka digunakan persamaan sebagai berikut.

$$P[N(t_2) - N(t_1) = n] = \frac{[W(t_2) - W(t_1)]^n}{n!} e^{-[W(t_2) - W(t_1)]} \quad (2.4)$$

Untuk $n = 0, 1, 2, \dots$

Dengan rata-rata jumlah kegagalan pada interval $[t_1, t_2]$ adalah sebagai berikut.

$$E(N(t_2) - N(t_1)) = W(t_2) - W(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} w(t) dt \quad (2.5)$$

2.3 Power Law Process

Power Law Process (PLP) atau model proses *Weibull* merupakan salah satu model yang digunakan untuk mengecek data yang mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Processes* (NHPP) dengan fungsi *survival* distribusi *weibull* dengan Persamaan (2.6) sebagai berikut (Rigdon and Basu, 2000).

$$S(x) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right], t > 0 \quad (2.6)$$

t merupakan variabel random dengan cdf adalah sebagai berikut.

$$F(x) = 1 - S(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right], t > 0 \quad (2.7)$$

Sehingga didapatkan pdf dan fungsi laju kerusakan sebagai berikut.

$$f(x) = F'(x) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right] \quad (2.8)$$

Sehingga,

$$w(t) = \frac{f(x)}{S(x)} = \frac{\frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]}{\exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]} \quad (2.9)$$

$$w(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$$

Persamaan 2.9 dapat membuktikan bagaimana sistem akan memburuk seiring dengan bertambahnya waktu. Jika $\beta > 1$, maka fungsi intensitas $w(t)$ meningkat. Sedangkan $\beta < 1$, maka $w(t)$

menurun dan jika $\beta = 1$, maka menunjukkan penurunan *power law process* menjadi lebih sederhana, yaitu *Homogeneous Poisson Processes* dengan fungsi intensitas $\frac{1}{\theta}$.

2.4 Failure Truncated data dan Time Truncated Data

Failure Truncated data akan terjadi ketika suatu pengamatan dalam *repairable system* berhenti setelah jumlah dari sebuah kegagalan ditetapkan sebelum observasi. Jumlah kegagalan dinotasikan dengan N_k yang merupakan *fixed* variabel. Sedangkan waktu kegagalan dinotasikan dengan T_k . Jika $Y_{N_k,k} = T_k$, maka waktu kegagalan adalah $Y_{N_1,k}, Y_{N_2,k}, \dots, Y_{N_{k-1},k}$ didistribusikan sebagai $N_k - 1$ order statistik dari distribusi *uniform* pada interval $(0, Y_{N_k,k})$.

Time Truncated data berarti jika suatu pengamatan berhenti ketika telah ditentukannya waktu ke- T , dengan kondisi N_k merupakan jumlah kegagalan dari interval waktu $(0, T_k)$ dan waktu kegagalan $T_1 < T_2 < \dots < T_k$ adalah *fixed* variabel yang didistribusikan sebagai N_k order statistik dari distribusi *uniform* pada interval $(0, T_k)$ (Leung and Cheng, 2000).

2.5 Maximum Likelihood Estimation (MLE) Time Truncated Data Masing-Masing Mesin

Nilai waktu kegagalan $T_1 < T_2 < \dots < T_N < t$, yang berarti pengamatan waktu kegagalan berhenti setelah ditetapkan waktu ke- T sehingga kegagalan ke- N merupakan variabel random. Fungsi density dari (N, T_1, \dots, T_N) adalah sebagai berikut (Rigdon and Basu, 2000).

$$f(n, t_1, \dots, t_n) = \begin{cases} f_N(n) f(t_1, \dots, t_n | n), & n \geq 1 \\ f_N(0), & n = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

N merupakan variabel random yang mengikuti distribusi poisson dengan nilai rata-rata $\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$ sehingga diperoleh Persamaan (2.11) sebagai berikut.

$$f_N(n) = \frac{\left[\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]^n \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]}{n!}, n=0,1,2,\dots \quad (2.11)$$

Jika diketahui nilai dari $g(y) = \frac{\beta}{t} \left(\frac{t_i}{t}\right)^{\beta-1}$, $0 \leq y \leq t$, maka

$$f(t_1, t_2, \dots, t_n | n) = n! \prod_{i=1}^n G'(t_i) = n! \prod_{i=1}^n \frac{\beta}{t} \left(\frac{t_i}{t}\right)^{\beta-1} \quad (2.12)$$

Untuk $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < t$.

Fungsi kepadatan peluang dari N dan $T_1 < T_2 < \dots < T_N$ adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} f(n, t_1, \dots, t_n) &= \frac{\left[\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]^n \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right]}{n!} n! \prod_{i=1}^n \frac{\beta}{t} \left(\frac{t_i}{t}\right)^{\beta-1} \\ &= \frac{t^{n\beta}}{\theta^{n\beta}} \frac{\beta^n}{t^n} \left[\prod_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{t}\right)\right]^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right] \\ &= \frac{\beta^n}{\theta^{n\beta}} \left[\prod_{i=1}^n t_i\right]^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

Untuk $n \geq 1, 0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n < t$.

Jika dirubah ke dalam bentuk logaritma natural disajikan pada Persamaan (2.14) sebagai berikut.

$$\ell(\theta, \beta | n, t) = n \ln \beta - n \ln \theta + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - n(\beta - 1) \ln \theta - \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \quad (2.14)$$

Jika Persamaan (2.14) diturunkan terhadap β hasilnya akan disajikan pada Persamaan (2.15) sebagai berikut.

(2.15)

$$\hat{\beta}_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^{n_i} \log\left(\frac{t}{t_i}\right)}$$

Untuk K homogeneous engines, unbiased conditional MLE dari β adalah sebagai berikut.

$$\bar{\beta}_i = \frac{n_i - 1}{n_i} \hat{\beta}_i \quad (2.16)$$

Dengan $i = 1, 2, \dots, n$

2.6 Goodness of Fit Test

Goodness of Fit Test merupakan suatu uji yang dapat digunakan untuk kecukupan model *Power Law Process* (PLP) dengan melihat apakah model telah sesuai atau tidak. Metode *Cramer-von Mises test* untuk menguji apakah waktu kegagalan dari sistem *repairable* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) dengan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF)

sebesar $\frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$. Hipotesis yang digunakan adalah sebagai

berikut (Crow, 1975).

H_0 : Waktu kegagalan untuk mesin ke- K mengikuti HPP dengan konstan ROCOF sebesar θ atau $\beta = 1$

H_1 : Waktu kegagalan untuk mesin ke- K mengikuti NHPP dengan konstan ROCOF $\frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$ atau $\beta \neq 1$

Data waktu kegagalan pada interval $[0, T_k]$ dengan data kegagalan mulai dari $0, X_{1,k} < X_{2,k} < \dots < X_{N_k,k} \leq T_k$ dengan $k = 1, 2, \dots, K$. Langkah-langkah untuk mendapatkan statistik uji C_R^2 adalah sebagai berikut.

1. Jika data merupakan *failure truncated* dengan $X_{N_k,k} = T_k$, maka $M_k = N_k - 1$. Jika data merupakan *time truncated* dengan

$X_{N,k} < T$, maka $M_k = N_k$ sehingga nilai $M = \sum_{k=1}^K M_k$. Jika setiap komponen pada masing-masing data kegagalan sampai pada waktu ke- T_k , dengan $i = 1, 2, \dots, M_k$, maka rumus yang digunakan untuk menghitung nilai $Y_{i,k}$ adalah sebagai berikut.

$$Y_{i,k}^* = \frac{Y_{i,k}}{T_k} \quad (2.17)$$

2. Memperlakukan nilai M pada $Y_{i,k}$ menjadi satu *group* mulai dari terkecil sampai ke terbesar yang dinyatakan dalam Z_j . Nilai Z_1 bernilai paling kecil dari $Y_{i,k}$, Z_2 bernilai lebih kecil dari $Y_{i,k}$, ... , Z_M lebih besar dari $Y_{i,k}$ untuk M adalah transformasi jumlah kegagalan dari N_k . Sehingga, statistik uji untuk metode *Cramer Von Mises* dinyatakan dalam Persamaan (2.18) sebagai berikut.

$$C_R^2 = \frac{1}{12n_i} + \sum_{i=1}^{n_i} \left(\hat{R}_i - \frac{2i-1}{2n_i} \right)^2 \quad (2.18)$$

Pengambilan keputusan H_0 ditolak jika nilai C_R^2 lebih kecil dari nilai kritis *Goodness of Fit Test Cramer Von Mises*. Taraf signifikan yang digunakan adalah sebesar 5%. Sehingga, kesimpulan yang dapat diambil adalah waktu kegagalan untuk mesin ke- K mengikuti NHPP dengan konstan ROCOF $\frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta} \right)^{\beta-1}$

atau $\beta \neq 1$.

2.7 Pengujian Persamaan Parameter dalam *Power Law Process*

Kehandalan dari suatu komponen dapat diketahui meningkat atau menurun dapat dilihat dengan menggunakan grafik sederhana. Selain itu, dapat digunakan untuk mengidentifikasi data dan membentuk suatu model dari data tersebut (Tsang,

2012). NHPP merupakan model statistik sederhana untuk mendeskripsikan terjadinya suatu kegagalan dalam sebuah *repairable system*. Pengujian yang digunakan untuk menguji apakah terdapat *trend* pada laju kegagalan dari suatu komponen dapat digunakan pengujian persamaan parameter β untuk dua sistem. Adapun langkah-langkah pengujian persamaan parameter β untuk dua sistem adalah sebagai berikut (Rigdon and Basu, 2000).

1. Hipotesis:

$H_0 : \beta_1 = \beta_2$ (Data membentuk pola *trend* yang sama)

$H_1 : \beta_1 \neq \beta_2$ (Data tidak membentuk pola *trend* yang sama)

2. Statistik uji

$$F = \frac{\hat{\beta}_2}{\hat{\beta}_1} \quad (2.19)$$

3. Daerah Kritis

H_0 ditolak jika $F < F_{1-\alpha/2}(2M_1, 2M_2)$ atau $F > F_{\alpha/2}(2M_1, 2M_2)$

dengan nilai M_1 adalah jumlah kerusakan yang terjadi pada mesin KCC dan M_2 merupakan jumlah kerusakan yang terjadi pada mesin FCB.

2.8 Membentuk NHPP Model dengan *Power Law Process*

Jika waktu kegagalan cenderung lebih besar diakhir interval $(0, T_k)$ atau dengan kata lain sistem semakin memburuk dan model *non-stasioner* dari proses kegagalan mengikuti NHPP. Namun, jika peningkatan kehandalan suatu komponen hingga proses kegagalan mengikuti HPP. Maka, pengujian estimasi *time truncated* data menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE).

Nilai waktu kegagalan $T_1 < T_2 < \dots < T_N < t$, yang berarti pengamatan waktu kegagalan berhenti setelah ditetapkan waktu ke-T sehingga kegagalan ke-N merupakan variabel random. *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) adalah model yang dapat

digunakan untuk setiap sistem, tidak menutup kemungkinan sistem yang tidak identik dalam arti bahwa MTBF mereka berbeda. Dalam kasus ini kita biasanya memperkirakan secara terpisah untuk setiap sistem ke-k. Estimasi parameter gabungan yang akan berlaku untuk mesin ketel KCC dan mesin ketel FCB menggunakan metode MLE untuk *time truncated* data. Pada asumsi *nonidentical system* akan menghitung estimasi parameter β gabungan yang dapat berlaku untuk kedua mesin dan nilai estimasi parameter θ_i masing-masing mesin. Salah satu ciri yang dapat dilihat bahwa suatu sistem memiliki *nonidentical system* adalah nilai estimasi θ_i berbeda jauh antar mesin dengan mesin yang lainnya. Berikut fungsi *Likelihood* yang digunakan (Rigdon and Basu, 2000).

$$\begin{aligned}
 L(\theta, \beta) &= \prod_{i=1}^k \left\{ \left[\prod_{j=1}^{n_i} \frac{\beta}{\theta_i} \left(\frac{t_{i,j}}{\theta_i} \right)^{\beta-1} \right] e^{\left[-\left(\frac{T_i}{\theta_i} \right)^{\beta} \right]} \right\} \\
 L(\theta, \beta) &= \prod_{i=1}^k \left\{ \left[\prod_{j=1}^{n_i} \frac{\beta}{\theta_i} \frac{(t_{i,j})^{\beta-1}}{(\theta_i)^{\beta-1}} \right] e^{\left[-\left(\frac{T_i}{\theta_i} \right)^{\beta} \right]} \right\} \quad (2.20) \\
 L(\theta, \beta) &= \beta^{\sum_{i=1}^k n_i} \left(\prod_{i=1}^k \frac{1}{\theta_i^{\beta}} \right) \left(\prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^{n_i} t_{ij} \right)^{\beta-1} e^{\left[-\sum_{i=1}^k \left(\frac{T_i}{\theta_i} \right)^{\beta} \right]} \\
 L(\theta, \beta) &= \beta^{\sum_{i=1}^k n_i} \left(\prod_{i=1}^k \theta_i^{-n_i \beta} \right) \left(\prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^{n_i} t_{ij} \right)^{\beta-1} e^{\left[-\sum_{i=1}^k \left(\frac{T_i}{\theta_i} \right)^{\beta} \right]}
 \end{aligned}$$

Sehingga fungsi *Log-Likelihood* yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \ell(\theta, \beta) &= \ln(L(\theta, \beta)) \quad (2.21) \\
 \ell(\theta, \beta) &= N \log \beta - \beta \sum_{i=1}^k n_i \log \theta_i + (\beta-1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \log t_{ij} - \sum_{i=1}^k \left(\frac{T_i}{\theta_i} \right)^{\beta}
 \end{aligned}$$

Penaksiran parameter diperoleh dengan menurunkan Persamaan 2.21 terhadap θ dan β diperoleh Persamaan 2.22 dan Persamaan 2.23 sebagai berikut.

$$\frac{\partial \ell}{\partial \theta_i} = \frac{\beta n_i}{\theta_i} + \frac{\beta}{\theta_i} \left(\frac{T_i}{\theta_i} \right)^\beta = 0, i = 1, 2, \dots, k \quad (2.22)$$

$$\hat{\theta}_i = \frac{T_i}{n_i^{\frac{1}{\beta}}}$$

$$\frac{\partial \ell}{\partial \beta} = \frac{N}{\beta} - \sum_{i=1}^k n_i \log \theta_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \log t_{ij} - \sum_{i=1}^k \left(\frac{T_i}{\theta_i} \right)^\beta \log \frac{T_i}{\theta_i} = 0 \quad (2.23)$$

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \log \frac{T_i}{t_{ij}}}$$

2.9 Replacement Model

Penggantian komponen secara mendadak akan menimbulkan biaya yang lebih besar dan juga tidak efisiennya perbaikan akibat waktu yang pendek dan mendesak. Pada stasiun ketel sebagai pembangkit tenaga uap yang berguna menggerakkan gilingan guna memproses tebu hingga menjadi nira mentah yang memanfaatkan limbah ampas dari tebu sangat membantu untuk meminimumkan biaya untuk pembiayaan listrik. Biaya yang timbul karena penggantian terencana akan lebih ekonomis karena akan mengurangi kerusakan yang akan berdampak pada stasiun lain terlebih lagi mengingat sebagian besar mesin yang ada di perusahaan gula berumur sangat tua. Suatu komponen pada mesin dapat diganti secara teratur dalam jangka waktu ke- T atau pada kegagalan ke- N setelah dilakukan instalasi, tergantung mana yang terlebih dahulu terjadi pertama kali. Kebijakan penggantian optimal yang berdasarkan dengan meminimumkan jangka panjang dari model biaya dinyatakan dalam Persamaan (2.24) sebagai berikut (Nakagawa and Kowada, 1983).

$$\begin{aligned} & TP_r \{Y_n > T\} + \int_0^T t dP_r \{Y_n \leq t\} \\ &= \int_0^T P_r \{Y_n > t\} dt \\ &= \sum_{j=0}^{n-1} \int_0^T \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} dt \end{aligned} \quad (2.24)$$

untuk $j = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$

Nilai ekspektasi dari waktu kegagalan sampai *replacement* komponen dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{n-1} jP_r \{N(T) = j\} + nP_r \{Y_n \leq T\} \\ &= n - \sum_{j=0}^{n-1} (n-j) \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Fungsi biaya pengganti komponen berdasarkan kerusakan ke- N dan waktu kerusakan ke- T dinyatakan dalam Persamaan 2.26 sebagai berikut.

$$C(t; n) = \frac{c_f \left[n - \sum_{j=0}^{n-1} (n-j) \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} \right] + c_p}{\sum_{j=0}^{n-1} \int_0^T \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} dt} \quad (2.26)$$

$T > 0, n = 1, 2, \dots, j = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$

c_f adalah *cost of failure* atau rata-rata biaya perbaikan karena kerusakan dan c_p adalah biaya perbaikan minimal atau biaya *preventive maintenance*. Kebijakan penggantian yang optimal untuk setiap jenis *engine* atau komponen ditentukan dengan meminimalkan persamaan $c(t; n)$ yang berhubungan dengan nilai T dan N .

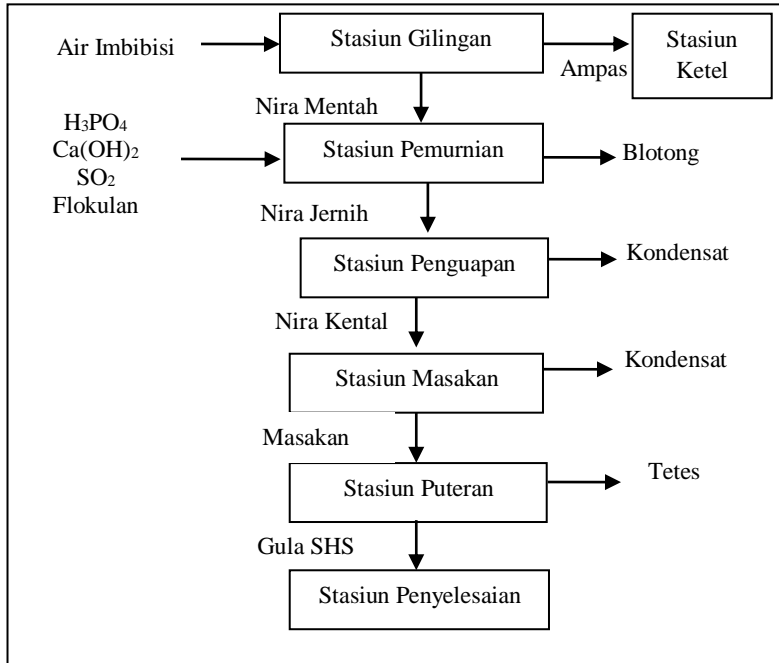
Fungsi nilai laju kerusakan terhadap waktu untuk *Power Law Process* adalah sebagai berikut.

$$W(t) = \int_0^t w(t) dt = \left(\frac{t}{\theta} \right)^\beta \quad (2.27)$$

2.10 Proses Produksi pada PT. PG X Sidoarjo

Proses produksi gula di PT. PG X Sidoarjo berawal dari stasiun gilingan stasiun gilingan, stasiun ketel, stasiun pemurnian, stasiun penguapan, stasiun masakan, stasiun puteran, dan stasiun penyelesaian degan hasil produksi gula SHS (*Superior Hooft Suiker*) atau GKP (Gula Kristal Putih) tipe 1A sebagai produk

utama. Berikut merupakan diagram proses produksi di PT. PG X Sidoarjo.

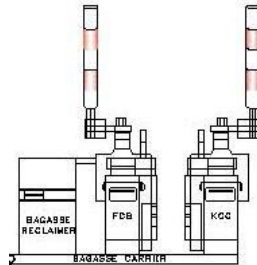


Gambar 2.1 Diagram Proses Produksi
(Sumber : PT. PG X)

Berdasarkan Gambar 2.1 dapat diketahui secara singkat proses produksi dari gula di PT. PG X Sidoarjo yang menunjukkan adanya 7 stasiun proses produksi. Pertama, tebu di potong kecil-kecil hingga diperas untuk memisahkan antara nira tebu dan ampas tebu terjadi pada stasiun gilingan. Selanjutnya hasil nira tebu diproses kembali di stasiun pemurnian sedangkan untuk ampas tebu masuk ke stasiun ketel. Pada nira tebu selanjutnya masuk pada stasiun penguapan, stasiun masakan, stasiun puteran dan yang terakhir pada stasiun penyelesaian.

Ampas tebu yang masuk pada stasiun ketel akan digunakan sebagai bahan bakar mesin ketel. Fungsi dari mesin ketel adalah sebagai penghasil tenaga listrik dari uap yang dapat digunakan sebagai pembantu alat gerak pada mesin gilingan dan generator. Jika pada mesin ketel mengalami kerusakan, maka proses produksi pada perusahaan akan berhenti beroperasi. Hal tersebut dikarenakan seluruh penggerak alat dan mesin giling pada saat musin giling hanya mengandalkan mesin ketel saja.

Berikut merupakan Gambar penampang dari mesin ketel di PT. PG X Sidoarjo.



Gambar 2.2 Mesin Ketel
(Sumber : PT. PG X Sidoarjo)

Gambar 2.2 menunjukkan 2 mesin ketel di PT. PG X Sidoarjo, yaitu KCC dan FCB. Kedua mesin ketel tersebut memiliki fungsi dan kapasitas produksi yang sama namun beroperasi secara independen. Artinya, satu diantara mesin ketel tidak berpengaruh terhadap mesin ketel lainnya namun fungsi dan kapasitas produksi yang sama. Perbedaan dari kedua ketel tersebut adalah obyek yang digerakkan. Mesin ketel KCC sebagai alat bantu penggerak generator dan mesin ketel FCB digunakan sebagai alat penggerak mesin giling. Hasil uap sisa dari kedua mesin ketel tersebut digunakan untuk stasiun masakan. Mesin ketel sangat berpengaruh besar pada proses produksi di PT. PG X atau disebut sebagai jantung produksi karena jika mesin ketel rusak, maka semua proses produksi tidak dapat berjalan. Hal tersebut pasti akan mengakibatkan perusahaan mengalami kerugian karena target produksi tidak akan tercapai.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari PT. PG X Sidoarjo. Variabel yang digunakan adalah usia pakai mesin ketel dalam satuan jam produksi yang dihitung selama musim giling hingga musim giling berakhir. Data yang digunakan mulai dari musim giling 2013 sampai dengan musim giling 2016.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah usia mesin beroperasi mesin ketel dalam satuan jam beroperasi pada saat musim giling sejak. Adapun struktur data pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

Tabel 3.1 Struktur Data

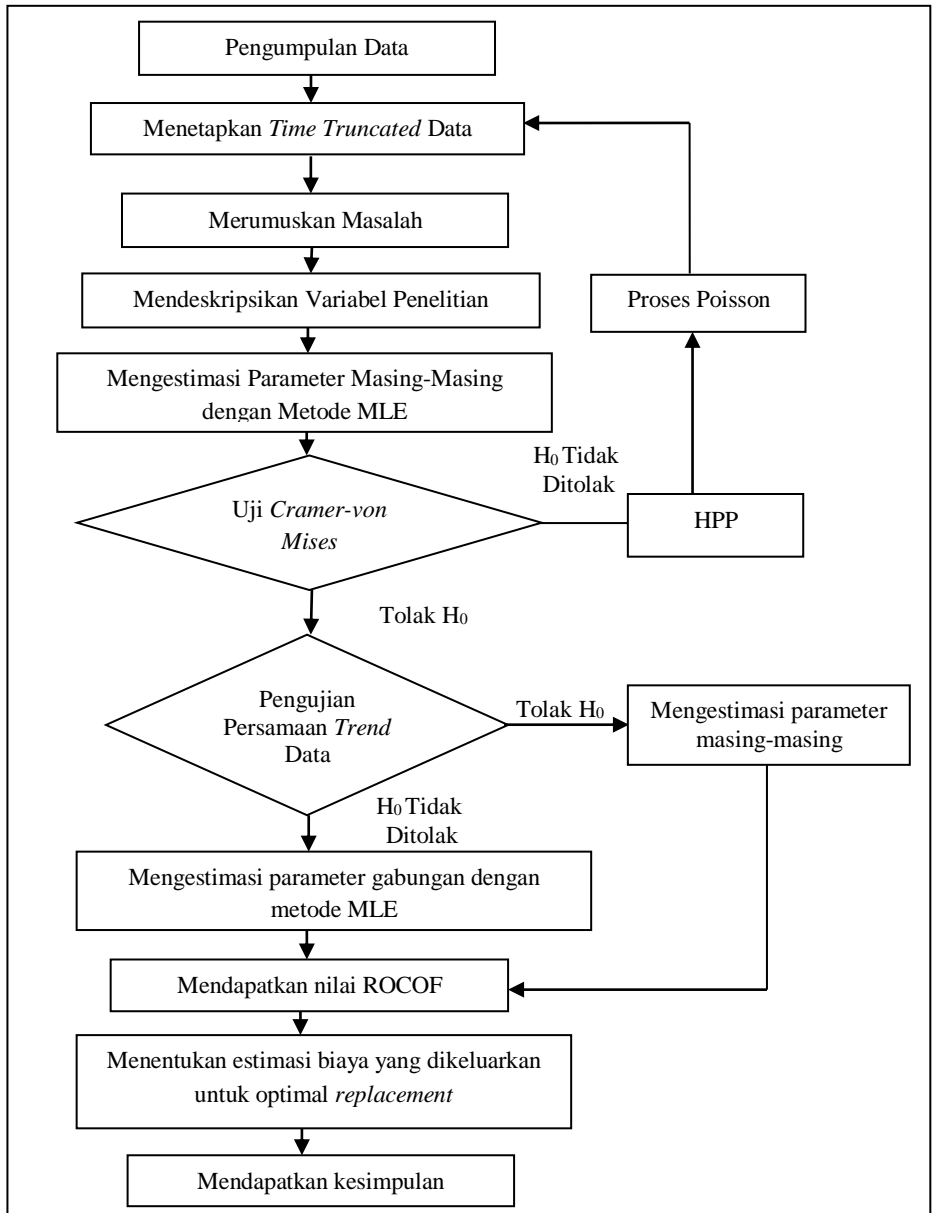
Kegagalan ke-i	Usia Pakai Mesin Ketel KCC (Jam Operasi)	Kegagalan ke-k	Usia Pakai Mesin Ketel FCB (Jam Operasi)
1	$Y_{1,1}$	1	$Y_{1,2}$
2	$Y_{2,1}$	2	$Y_{2,2}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$N_{i,1}$	$Y_{N_{i,1}}$	$N_{k,2}$	$Y_{N_{k,2}}$

3.3 Langkah Analisis

Langkah analisis yang dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengumpulkan variabel usia pakai mesin ketel.
2. Menetapkan *time truncated* untuk pengamatan.
3. Mendeskripsikan jumlah kerusakan dan waktu kerusakan mesin ketel di PT. PG X Sidoarjo.
4. Melakukan estmasi parameter pada masing-masing mesin ketel menggunakan *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) untuk model *time truncated* data.

5. Berdasarkan poin 4, setelah mendapatkan estimasi parameter, maka selanjutnya dilakukan pengujian *Cramer-von Mises test* untuk mengetahui apakah waktu kegagalan mesin ketel mengikuti NHPP atau HPP. Jika mengikuti HPP, maka perlu dilakukan point 1. Jika mengikuti NHPP dapat dilakukan analisis selanjutnya.
6. Melakukan pengujian persamaan parameter dalam *power law process* untuk mengetahui apakah mesin ketel KCC dan FCB memiliki *trend* laju kerusakan yang sama. Jika sama, maka untuk kedua mesin ketel hanya terdapat satu kebijakan waktu optimasi. Namun jika tidak sama, maka kedua ketel memiliki kebijakan waktu optimasi yang berbeda.
7. Berdasarkan point 6, jika mendapatkan kesimpulan kedua mesin memiliki pola *trend* yang sama, maka dilakukan estimasi parameter untuk memperoleh estimasi parameter β gabungan yang dapat berlaku untuk kedua mesin dan nilai estimasi parameter θ_i masing-masing mesin.
8. Mendapatkan grafik dari nilai ROCOF untuk mesin ketel.
9. Mendapatkan model optimasi untuk menentukan waktu penggantian yang meminimumkan biaya kerusakan mesin ketel di PT. PG X Sidoarjo.
 - a. Mendapat fungsi laju kerusakan terhadap waktu $W(t)$.
 - b. Memilih T dan N .
 - c. Menghitung $c(T; N)$ hingga memperoleh nilai yang minimum dari $c(T; N)$.
10. Mendapat kesimpulan dari analisis yang didapatkan.
Berdasarkan langkah analisis penelitian, dapat disusun dalam diagram alir penelitian sebagai berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir

(Halaman Ini Sengaja Dikosongi)

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik *Time Truncated Data* Mesin Ketel KCC dan FCB

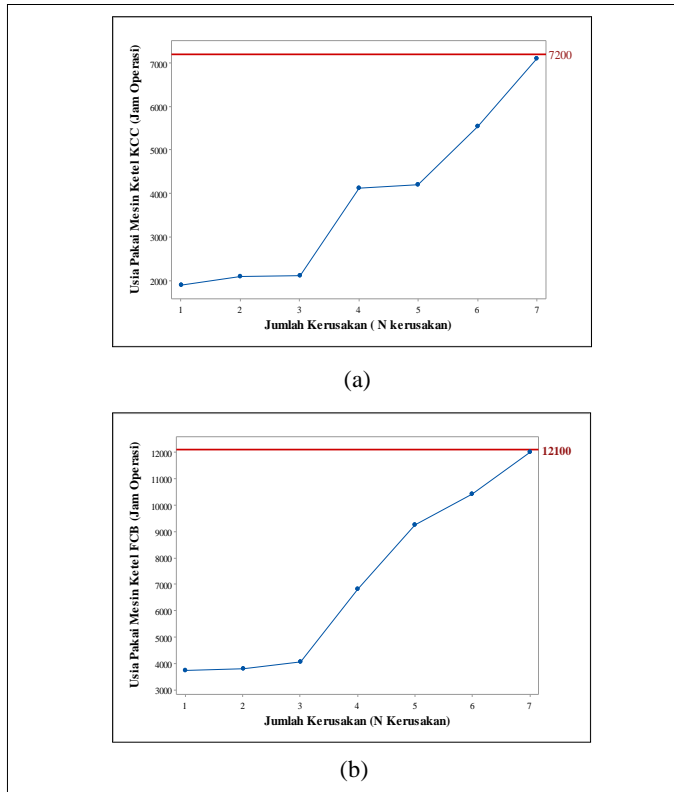
PT. PG X Sidoarjo memiliki dua buah mesin ketel yang bekerja secara independen, dalam artian jalannya mesin satu tidak akan mempengaruhi jalannya mesin lainnya. Sehingga, jika salah satu mengalami kerusakan maka mesin lainnya akan tetap bisa berjalan. Namun, kerusakan suatu mesin pasti akan mempengaruhi jalannya suatu sistem. Hal tersebut akhirnya yang menjadikan pentingnya perhitungan waktu optimum melakukan perawatan pada mesin ketel supaya sistem di PT. PG X Sidoarjo tetap berjalan lancar.

Penelitian ini menggunakan *time truncated data* menggunakan nilai T yang ditetapkan sebesar 7200 jam operasi pada mesin ketel KCC dan 12100 jam operasi pada mesin ketel FCB. Artinya, pengamatan akan berhenti dilakukan pada saat komponen telah beroperasi selama 7200 jam operasi pada mesin ketel KCC dan setelah mesin FCB beroperasi selama 12100 jam operasi. Sehingga, akan diketahui jumlah kerusakan (N) yang berbeda antara mesin satu dengan mesin yang lainnya dikarenakan nilai N merupakan variabel random. Karakteristik dari mesin ketel KCC dan mesin ketel FCB disajikan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Karakteristik *Time Truncated Data* Usia Pakai (*Lifetime*)

Kerusakan	<i>Lifetime</i> KCC (Jam Operasi)	Kerusakan	<i>Lifetime</i> FCB (Jam Operasi)
1	1896	1	3744
2	2088	2	3792
3	2112	3	4056
4	4128	4	6816
5	4200	5	9264
6	5544	6	10416
7	7104	7	12024

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa *lifetime* pada mesin ketel KCC dan FCB usia pakai mesin yang paling tinggi merupakan mesin ketel FCB dengan usia pakai selama 12024 jam operasi dengan mengalami kerusakan pertama kali pada saat 3744 jam operasi. Data Tabel 4.1 jika di plotkan terbentuk seperti pada Gambar 4.1 sebagai berikut.



Gambar 4.1 Jumlah Kerusakan Mesin KCC (a) dan Mesin FCB (b)

Berdasarkan Gambar 4.1 dapat diketahui bahwa usia pakai mesin ketel KCC dengan waktu terpotong selama 7200 jam beroperasi (a) mengalami kerusakan sebanyak 7 kali dengan pertama kali kerusakan terjadi pada 1896 jam operasi. Sedangkan

pada mesin ketel FCB diketahui jika terpotong waktu operasi 12100 jam operasi, maka terjadi sebanyak 7 kali kerusakan dengan pertama kali mengalami kerusakan pada 3744 jam operasi. Sehingga, mesin KCC lebih cepat mengalami kerusakan daripada mesin ketel FCB, namun Berdasarkan pola yang terbentuk data usia pakai mesin KCC dan FCB, kedua mesin memiliki trend yang meningkat hal tersebut menunjukkan bahwa semakin lama mesin tersebut digunakan maka waktu antar kerusakan semakin kecil atau semakin sering terjadi kerusakan.

4.2 Estimasi Parameter Masing-Masing Mesin Ketel

Estimasi parameter untuk data *lifetime* mesin ketel KCC maupun mesin ketel FCB menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* untuk *time truncated data*. Proses perhitungan nilai $\hat{\beta}_i$ dengan menggunakan Persamaan 2.15 adalah sebagai berikut.

$$\hat{\beta}_1 = \frac{n_1}{\sum_{i=1}^{n_1} \log\left(\frac{t}{t_i}\right)} = \frac{7}{5,17} = 1,35 \qquad \hat{\beta}_2 = \frac{n_2}{\sum_{i=1}^{n_2-1} \log\left(\frac{t}{t_i}\right)} = \frac{7}{4,42} = 1,58$$

Berdasarkan hasil perhitungan diketahui bahwa nilai penaksiran parameter $\hat{\beta}_i$ pada mesin ketel KCC ($\hat{\beta}_1$) sebesar 1,35. Sedangkan nilai penaksiran parameter ($\hat{\beta}_2$) pada mesin ketel FCB sebesar 1,58. Berdasarkan hasil penaksiran parameter $\hat{\beta}_i$ yang bernilai lebih dari 1, maka dapat diindikasikan bahwa laju kerusakan kedua mesin meningkat atau dengan kata lain semakin lama mesin tersebut digunakan, maka semakin sering pula terjadi kerusakan. Secara teori, hal tersebut sangat sesuai dengan definisi *Non Homogeneous Poisson Process* (NHPP) yakni *poisson process* dengan fungsi intensitas tidak konstan dengan laju kedatangan atau laju kerusakan berevolusi terhadap waktu. Berikut pengujian yang dilakukan untuk membuktikan teori tersebut menggunakan *Goodness of Fit Test* dengan metode *Cramer-von Mises test*.

4.3 Goodness of Fit Test

Goodnes of fit test dilakukan guna mengetahui apakah model sesuai dengan metode *Power Law Process* (PLP) atau tidak. Metode *Cramer-von Mises test* yang akan digunakan untuk menguji apakah waktu kegagalan dari *repairable system* mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP) dengan *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF) atau laju kerusakan yang tidak konstan. *Null hypothesis* yang digunakan adalah data *lifetime* masing-masing mesin ketel mengikuti *Homogeneous Poisson Process* dengan nilai ROCOF sebesar $\frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1}$ dan *alternative hypothesis* yang digunakan adalah data *lifetime* masing-masing mesin ketel mengikuti NHPP dengan konstan ROCOF $\frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^{\beta-1}$ atau $\beta \neq 1$

Dengan menggunakan $\alpha = 5\%$, *critical value* pada pengujian *Cramer-von Mises test* (C_R^2) lebih kecil dari nilai tabel *Cramer-von Mises* yaitu 0,207. Penelitian ini menggunakan *time truncated data* dimana $M_k = N_k$, sehingga Tabel 4.3 merupakan hasil perhitungan C_R^2 dengan Persamaan 2.18 dan proses hitunganya pada Lampiran 2A.

Tabel 4.2 Statistik Uji *Cramer-von Mises Test*

Mesin	$\hat{\beta}_i$	$\bar{\beta}_i$	C_R^2
KCC	1,35	1,16	0,063
FCB	1,58	1,35	0,077

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa nilai statistik uji *Cramer-von Mises Test* pada mesin KCC sebesar 0,063 dan pada mesin FCB sebesar 0,077. Berdasarkan nilai statistik uji pada *Cramer-von Mises test* pada kedua mesin diperoleh keputusan tolak H_0 karena memiliki nilai (C_R^2) lebih kecil dari nilai tabel (0,207). Sehingga, dapat diberi kesimpulan bahwa kerusakan yang terjadi pada kedua mesin ketel telah sesuai dengan model *Non Homogeneous Poisson Process* (NHPP) dengan *Power Law Process* (PLP).

Selanjutnya dilakukan pengujian persamaan parameter untuk mengetahui apakah kedua mesin telah pola *trend* laju kerusakan yang sama atau tidak.

4.4 Pengujian Persamaan Parameter dalam *Power Law Process*

Pengujian persamaan parameter pada mesin ketel KCC dan mesin FCB dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat persamaan pola *trend* laju kerusakan. Sehingga, akan dapat diketahui apakah nilai laju kerusakan kedua mesin tersebut dapat digabung atau tidak. Pada pengujian ini menggunakan *null hypothesis* $\beta_1 = \beta_2$ atau dengan kata lain kedua mesin memiliki pola *trend* laju kerusakan yang sama dan *alternative hypothesis* $\beta_1 \neq \beta_2$ atau dengan kata lain kedua mesin memiliki pola *trend* laju kerusakan yang berbeda. Taraf signifikan yang digunakan adalah 5% dan nilai *critical value* adalah nilai $F < F_{1-\frac{0,05}{2}}(14,14) = 0,33$

atau $F > F_{\frac{0,05}{2}}(14,14) = 2,98$. Berikut merupakan hasil perhitungan statistik uji F menggunakan Persamaan 2.19.

$$F = \frac{\frac{1}{\hat{\beta}_1}}{\frac{1}{\hat{\beta}_2}} = \frac{\hat{\beta}_2}{\hat{\beta}_1}$$

$$F = \frac{1,58}{1,35} = 1,17$$

Berdasarkan perhitungan diperoleh nilai statistik uji F sebesar 1,17. Sehingga, diperoleh keputusan terima H_0 atau mesin ketel KCC dan mesin ketel FCB memiliki pola *trend* laju kerusakan yang sama. Selanjutnya, dilakukan perhitungan untuk estimasi parameter $\hat{\beta}$ gabungan yang dapat berlaku untuk kedua mesin.

4.5 Estimasi Parameter Gabungan *Nonidentical Systems*

Non Homogeneous Poisson Process (NHPP) adalah model yang dapat digunakan untuk setiap sistem, tidak menutup kemungkinan sistem yang tidak identik dalam arti bahwa MTBF mereka berbeda. Dalam kasus ini, kedua mesin ketel diduga memiliki sifat yang tidak identik. Meskipun kedua mesin ketel memiliki fungsi yang sama, yaitu sebagai alat penggerak yang berupa uap panas. Namun, perbedaan obyek yang digerakkan oleh kedua mesin ketel tersebut yang diduga sebagai penyebab keduanya saling tidak identik. Mesin ketel KCC berguna sebagai penggerak generator. Sedangkan mesin ketel FCB khusus digunakan sebagai penggerak mesin gilingan. Dimana uap sisa dari keduanya digunakan untuk stasiun masakan.

Estimasi parameter gabungan yang akan berlaku untuk mesin ketel KCC dan mesin ketel FCB menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* untuk *time truncated data*. Proses perhitungan nilai $\hat{\beta}$ dan $\hat{\theta}$ menggunakan Persamaan 2.22 dan Persamaan 2.23 yang disajikan pada Lampiran 3A. Sedangkan hasil perhitungan disajikan pada Tabel 4.3 sebagai berikut.

Tabel 4.3 Estimasi Parameter Gabungan *Nonidentical System*

Mesin	$\hat{\beta}$	$\hat{\theta}_i$
KCC	1,46	1898,88
FCB		3191,18

Berdasarkan Tabel 4.3 dapat diketahui bahwa nilai estimasi parameter $\hat{\beta}$ gabungan adalah sebesar 1,46. Sedangkan untuk estimasi parameter $\hat{\theta}$ pada mesin KCC adalah sebesar 1898,88 dan pada mesin FCB adalah sebesar 3191,18. Salah satu ciri sistem dikatakan *nonidentic system* adalah terlihat pada nilai $\hat{\theta}$ yang terpaut jauh antara satu mesin dengan mesin lainnya.

Setelah estimasi parameter telah diperoleh, maka dengan nilai tersebut dapat digunakan untuk menghitung nilai *Rate of*

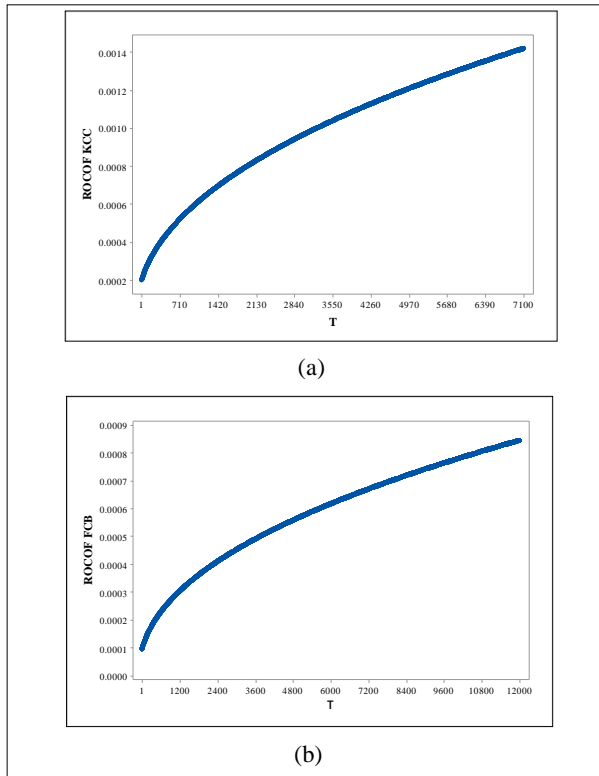
Occurrence of Failure (ROCOF). ROCOF merupakan estimasi dari nilai laju kerusakan suatu komponen. Jika suatu komponen *repairable* telah di observasi pada interval waktu $[0, t]$ dengan t dapat ditentukan interval waktunya. Hasil perhitungan nilai ROCOF ditunjukkan pada Lampiran 4A-4B dan dirangkum pada Tabel 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4.4 *Rate of Occurrence of Failure* (ROCOF)
Mesin Ketel KCC dan FCB

T	ROCOF Mesin KCC	T	ROCOF Mesin FCB
1000	0.000572	1000	0.000268
2000	0.000787	2000	0.000369
3000	0.000949	3000	0.000445
4000	0.001083	4000	0.000508
5000	0.0012	5000	0.000562
6000	0.001305	6000	0.000612
7200	0.001419	12100	0.000845

Tabel 4.4 menunjukkan nilai ROCOF pada kedua mesin ketel dengan laju kerusakan dari waktu ke waktu terus meningkat untuk setiap mesin. Adanya *trend* meningkat tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi laju kerusakan, maka akan semakin besar pula kemungkinan komponen tersebut akan gagal beroperasi. Sehingga, terbukti bahwa pada mesin ketel KCC dan FCB mengikuti *Non Homogeneous Poisson Process* (NHPP).

Gambar 4.2 menunjukkan gambar jika hasil perhitungan nilai ROCOF. bahwa laju kerusakan pada mesin ketel KCC (a) meningkat hingga waktu ke 7200 jam operasi. Sedangkan pada mesin FCB (b) laju kerusakan meningkat hingga waktu ke 12100 jam operasi. Secara visual, laju kerusakan yang meningkat dari waktu ke waktu yang dialami oleh kedua mesin ketel menunjukkan bahwa mesin tidak *reliable* atau lemah. Adanya *trend* naik atau tidak *constant*, telah membuktikan bahwa kedua mesin ketel mengikuti *Non Homogeneous Poisson Process* (NHPP).



Gambar 4.2 *Rate of Occurrence of Failure (ROCOF)*
Mesin KCC (a) dan Mesin FCB (b)

4.6 Replacement Model

PT. PG X Sidoarjo memiliki sistem produksi 6 bulan giling dan 6 bulan tidak giling. Pada saat musim tidak giling dimanfaatkan untuk perawatan secara keseluruhan. Harapannya pada saat musim giling keseluruhan mesin yang digunakan untuk proses produksi tidak mengalami hambatan atau kerusakan. Perawatan dilaksanakan semaksimal mungkin sampai dinyatakan suatu mesin lolos uji oleh perusahaan dan siap memproduksi kembali. Namun, pada kenyataannya kerusakan pada mesin ketel masih sering terjadi pada saat musim giling. Hal tersebut yang

mengakibatkan kerugian yang ditimbulkan pergantian alat dan adanya *product lost*. Selanjutnya, akan diperjelas untuk biaya perawatan maupun biaya akibat kerusakan.

4.6.1 Nilai c_f dan c_p

Terdapat dua biaya yang digunakan untuk menghitung *replacement model*. Biaya tersebut adalah c_p yaitu rata-rata biaya perbaikan minimum atau biaya yang dikeluarkan untuk penggantian secara terencana (*preventive maintenance*). Sedangkan c_f adalah rata-rata biaya yang harus dikeluarkan jika terjadi kerusakan (*Cost of Failure*). PT. PG X Sidoarjo memberikan informasi rata-rata biaya untuk setiap pemeliharaan atau *preventive maintenance* selama musim tidak giling adalah sebesar Rp 420.639,456 per jam operasi. Sedangkan rata-rata biaya yang dibutuhkan jika terjadi kerusakan yang mendadak dari mesin ketel pada saat musim giling adalah sebesar Rp539.515.213 per jam operasi. Rincian untuk penggunaan biaya ditiliskan pada Lampiran 5A dan ringkasan penggunaan biaya akibat kerusakan disajikan Tabel 4.5 sebagai berikut.

Tabel 4.5 Rincian *Cost of Failure*

Penggunaan Biaya	Nominal Biaya yang Digunakan
Alat dan Tenaga Kerja (jam Operasi)	Rp 140.213,1519
<i>Lost Profit</i> (jam Operasi)	Rp 539.375.000
C_f	Rp 539.515.213

Tabel 4.5 menunjukkan rincian biaya yang dikeluarkan jika pada mesin ketel mengalami kerusakan pada saat musim giling. Pengeluaran untuk alat dan tenaga kerja diperlukan biaya sebesar Rp 140.213,1519 per jam operasi dan pada biaya yang dikeluarkan akibat tidak tercapainya target produksi adalah

sebesar Rp 539.375.000 per jam operasi. Sehingga, dapat diketahui total C_f sebesar Rp539.515.213 per jam operasi. Nilai C_p dan C_f selanjutnya disubsitusikan ke Persamaan 2.25 sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$C(T;n) = \frac{539.515.213 \left[n - \sum_{j=0}^{n-1} (n-j) \frac{[W(T)]^j}{j!} e^{-W(T)} \right] + 420.639,456}{\sum_{j=0}^{n-1} \int_0^T \frac{[W(t)]^j}{j!} e^{-W(t)} dt}$$

4.6.2 Perhitungan Estimasi Biaya

Sebelum mendapatkan nilai minimum dari $C(T;n)$, maka terlebih dahulu dicari nilai laju kerusakan terhadap waktu. Hal tersebut dilakukan dengan mensubsitusikan nilai parameter $\hat{\beta}$ dan $\hat{\theta}$ kedalam persamaan. Langkah yang perlu dilakukan adalah dengan memilih nilai T dan N secara berpasangan yang akan mensubsitusikan c_f dan c_p ke persamaan .

Prosedur iteratif menggunakan perhitungan integral trapesium yang digunakan, tertera pada Lampiran 6A dengan menggunakan Persamaan (2.25). Hasil estimasi biaya pada mesin ketel dengan menggunakan *time truncated* pada kerusakan pertama hingga keempat. Pada perhitungan estimasi biaya akan dihitung untuk masing-masing mesin. Mesin KCC dihitung menggunakan nilai $\hat{\beta} = 1,46$ dan $\hat{\theta} = 1898,88$ yang disajikan pada Tabel 4.6. Sedangkan pada mesin FCB dihitung menggunakan nilai $\hat{\beta} = 1,46$ dan $\hat{\theta} = 3191,18$ yang disajikan pada Tabel 4.7 sebagai berikut.

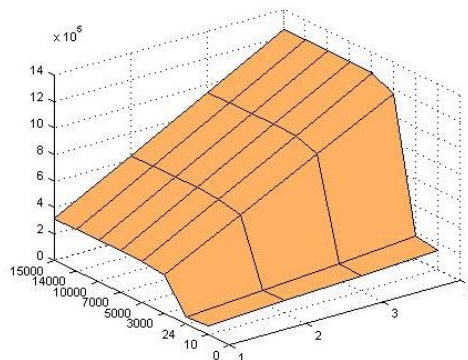
Berdasarkan Tabel 4.6 dapat diketahui bahwa hasil perhitungan dari $C(T;n)$ pada mesin ketel KCC dengan nilai $\hat{\beta}$ sebesar 1,46 dan nilai $\hat{\theta}$ sebesar 1898,88 diperoleh biaya perbaikan mesin ketel yang paling minimum sebesar Rp 55.633 setiap jam operasi yaitu pada saat mesin telah beroperasi selama

24 jam atau pada saat mengalami kerusakan pertama kali tergantung mana dulu yang terjadi. Artinya, mesin ketel sebaiknya dilakukan perawatan ketika telah beroperasi selama 24 jam operasi pada saat musim giling atau setelah pertama kali terjadi kerusakan pada musim giling tergantung mana dulu yang terjadi.

Tabel 4.6 Ekspektasi Biaya Mesin KCC

T	N			
	1	2	3	4
10	67571.42	93028.74	118486	143943.4
24*	55632.99	93709.74	131786.5	169863.2
3000	292096.2	583927.2	875758.2	1167589
5000	311084.4	621922.4	932760.4	1243598
7000	313664.4	627084.2	940504	1253924
10000	313888.5	627532.5	941176.4	1254820
14000	313891	627537.4	941183.8	1254830
15000	313891	627537.4	941183.8	1254830

Tabel 4.6 jika digambarkan terbentuk seperti pada Gambar 4.3 sebagai berikut.



Gambar 4.3 Ekspektasi Optimasi Biaya Perawatan Mesin Ketel KCC

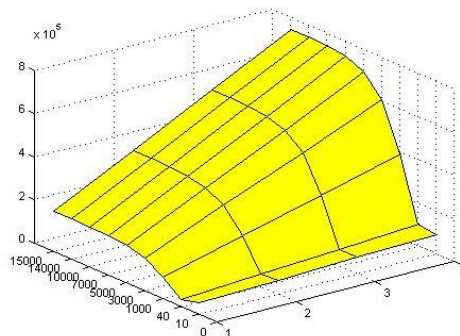
Berdasarkan Tabel 4.7 dapat diketahui bahwa hasil perhitungan dari $C(T;n)$ pada mesin ketel FCB dengan nilai $\hat{\beta}$ sebesar 1,46 dan nilai $\hat{\theta}$ sebesar 3191,18 diperoleh biaya

perbaikan mesin ketel yang paling minimum sebesar Rp 33.105 setiap jam operasi yaitu pada saat mesin telah beroperasi selama 40 jam atau setelah mesin ketel FCB mengalami kerusakan pertama kali tergantung mana dulu yang terjadi. Sehingga, mesin ketel FCB sebaiknya dilakukan perawatan jika telah beroperasi selama 40 jam pada saat musim giling atau pertama kali terjadi kerusakan pada musim giling tergantung mana dulu yang terjadi.

Tabel 4.7 Ekspektasi Biaya $\hat{\beta} = 1,46$ dan $\hat{\theta} = 3191,18$

T	N			
	1	2	3	4
10	54040.37	65970.92	77901.46	89832.01
40*	33104.54	55675.43	78246.31	100817.2
1000	97978.66	195504.3	293030	390555.7
3000	150917.1	301638.1	452359	603080
5000	173515.7	346873.3	520230.8	693588.3
7000	182607.9	365067.1	547526.4	729985.7
10000	186244.4	372343.1	558441.7	744540.3
14000	186757.6	373369.6	559981.7	746593.7
15000	186769.5	373393.6	560017.6	746641.6

Tabel 4.7 jika digambarkan terbentuk seperti pada Gambar 4.4 sebagai berikut.



Gambar 4.4 Ekspektasi Optimasi Biaya Perawatan Mesin Ketel FCB

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil estimasi parameter $\hat{\beta}$ diperoleh nilai lebih dari 1 pada masing-masing mesin. Sehingga, pola *trend* laju kerusakan meningkat dari waktu ke waktu tidak *constant*. Hal tersebut diindikasikan bahwa kedua mesin ketel mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP).
2. Berdasarkan *Cramer-van Mises test*, membuktikan bahwa kedua mesin ketel tersebut telah model mengikuti *Non-Homogeneous Poisson Process* (NHPP).
3. Berdasarkan pengujian persamaan parameter diperoleh hasil bahwa kedua mesin memiliki pola *trend* laju kerusakan yang sama. Sehingga, parameter $\hat{\beta}$ gabungan dapat berlaku untuk kedua mesin.
4. Berdasarkan hasil perhitungan waktu perawatan, diketahui untuk mesin ketel KCC sebaiknya dilakukan perawatan setelah beroperasi selama 24 jam atau jika telah terjadi kerusakan yang pertama tergantung mana dulu yang terjadi. dengan biaya yang minimum sebesar Rp 55.633 per jam operasi. Sedangkan untuk mesin ketel FCB sebaiknya dilakukan perawatan setelah beroperasi selama 40 jam atau setelah mengalami kerusakan yang pertama tergantung mana dulu yang terjadi dengan biaya minimum sebesar Rp 33.105 per jam operasi.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil analisis yang diperoleh adalah sebagai berikut.

1. Peneliti menganggap bahwa mesin ketel akan bekerja *as good as new* setelah mengalami perawatan pada mesin tidak

giling. Seharusnya tidak demikian, sehingga, untuk peneliti berikutnya memberikan metode yang baru sehingga memberikan kesimpulan yang baru pula.

2. Penelitian ini menggunakan faktor internal pada mesin ketel tersebut tanpa memperhatikan faktor eksternal dari mesin ketel. Harapannya pada penelitian selanjutnya mampu mengidentifikasi penyebab kerusakan dari mesin ketel baik faktor internal maupun faktor eksternal.
3. Penelitian ini menggunakan *trial and error* untuk menentukan jumlah kerusakan dan waktu operasi untuk perawatan. Harapannya penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode yang sesuai sehingga dapat diketahui jumlah kerusakan dan waktu operasi yang tepat.
4. Bagi perusahaan, sebaiknya lebih teliti dalam pengambilan dan pencatatan data kerusakan pada setiap mesin produksi yang digunakan. Tujuannya agar mampu diketahui penjadwalan yang tepat untuk perawatan sehingga tidak sampai terjadi kerusakan pada mesin tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Crowder, M.J., Kimber, A.C., Smith, R.L., & Sweeting, T.J. (1991). *"Statistical Analysis of Reliability Data"*. Springer Science Business Media.
- Crow, L.H. (1975). *Reliability Analysis for Complex, Repairable System*. AMSAA Technical Report No. 138, 1-35.
- Faisal, M. Z. (2011, 12 19). Retrieved 2017, from <https://muhammadzakylfaisal.wordpress.com/2011/12/19/pengertimaintenance-secara-umum/>
- Hoyland, A. & Rausand, M. (1994). *System Reliability Engineering Theory*. New York: John Wiley & Sons.
- Leung, F.K.N & Cheng A.L.M (2000). Determining Replacement Policies for Bus Engines. *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 17, pp. 771-783.
- Nakagawa, T. & Kowanda, M. (1983). *Analysis Of A Systems With Minimal Repair And Its Application To Replacement Policy*. *European Journal of Operational Research*. Vol, 12, pp. 176-182.
- O'Connor, P. (2012). *Practical Reliability Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Rigdon, S. E. & Basu, A.P. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable System*. New York: John Wiley&Sons, INC.
- Permatasari, P. (2016). *Optimasi Waktu Pergantian Komponen Air Cycle Machine (ACM) Pesawat Terbang CRJ-1000 Menggunakan Metode Geometric Process*. Surabaya: 2016.
- PG X. (2010). *Profile PT. PG X*. Retrieved 01 17, 2017, from <http://www.X.com/profil.html>
- Rigdon, S. E. & Basu, A.P. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable System*. New York: John Wiley&Sons, INC.

Tyas, N. A. (2016). *Penentuan Kebijakan Waktu Optimum Perbaikan Komponen Heat Exchanger (HE) Pesawat Boeing 737-800 Menggunakan Metode Power Law Process di PT. Garuda Maintenance Facility (GMF) Aero Asia*. Laporan Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jurusan Statistika, Surabaya.

LAMPIRAN

Lampiran 1A. Data *Lifetime* Mesin Ketel KCC

Kerusakan	Tanggal	Usia Pakai Mesin KCC (Jam Operasi)	$x_i - x_{i-1}$ (Jam Operasi)
1	22/08/2014	1896	1896
2	31/08/2014	2088	192
3	01/09/2014	2112	24
4	30/08/2015	4128	2016
5	13/06/2016	4200	72
6	21/08/2016	5544	1344
7	29/10/2016	7104	1560

Lampiran 1B. Data *Lifetime* Mesin Ketel FCB

Kerusakan	Tanggal	Usia Pakai Mesin FCB (Jam Operasi)	$x_i - x_{i-1}$ (Jam Operasi)
1	02/06/2014	3744	3744
2	12/10/2014	3792	48
3	17/09/2015	4056	264
4	08/11/2015	6816	2760
5	29/08/2016	9264	2448
6	04/09/2016	10416	1152
7	15/10/2016	12024	1608

Lampiran 2A. *Goodness of Fit Test*

$$\bar{\beta}_2 = \frac{n_2 - 1}{n_2} \hat{\beta}_2$$

$$\bar{\beta}_2 = \frac{7 - 1}{7} (1,58)$$

$$\bar{\beta}_2 = 1,35$$

$$\bar{\beta}_1 = \frac{n_1 - 1}{n_1} \hat{\beta}_1$$

$$\bar{\beta}_1 = \frac{7 - 1}{7} (1,35)$$

$$\bar{\beta}_1 = 1,16$$

Mesin Ketel KCC

kerusakan	Usia pakai KCC (jam)	T	Ri	(2i-1)/2n	Ri-((2i-1)/2n)	C _R
1	1896	7200	0.21271	0.07	0.02	0.063
2	2088	7200	0.23789	0.21	0.00	
3	2112	7200	0.24107	0.36	0.01	
4	4128	7200	0.52451	0.50	0.00	
5	4200	7200	0.53514	0.64	0.01	
6	5544	7200	0.73846	0.79	0.00	
7	7104	7200	0.98455	0.93	0.00	
TOTAL	27072		3.47		0.052	

Mesin Ketel FCB

kerusakan	Usia pakai FCB (jam)	T	Ri	(2i-1)/2n	Ri-((2i-1)/2n)	C _R
1	3744	12100	0.21	0.14	0.00	0.076
2	3792	12100	0.21	0.29	0.01	
3	4056	12100	0.23	0.43	0.04	
4	6816	12100	0.46	0.57	0.01	
5	9264	12100	0.70	0.71	0.00	
6	10416	12100	0.82	0.86	0.00	
7	12024	12100	0.99	1.00	0.00	
TOTAL	50112		3.61		0.06	

$$\hat{R}_i = \left(\frac{t_i}{t}\right)^{\hat{\beta}}$$

$$\hat{R}_1 = 3,47$$

$$\hat{R}_2 = 3,61$$

$$C^2_{R_i} = \frac{1}{12n_i} + \sum_{i=1}^{n_i} \left(\hat{R}_i - \frac{2i-1}{2n_i}\right)^2$$

$$C^2_{R_1} = 0,063$$

$$C^2_{R_2} = 0,077$$

Lampiran 3A. Estimasi Parameter Gabungan *Nonidentical Systems*

$$\hat{\beta} = \frac{N}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^7 \log \left(\frac{T}{t_{ij}} \right)}$$

$$\hat{\beta} = \frac{14}{(5,17 + 4,42)}$$

$$\hat{\beta} = 1,46$$

$$\hat{\theta}_1 = \frac{T_i}{n_1^{\frac{1}{\beta}}}$$

$$\hat{\theta}_1 = \frac{7200}{7^{\frac{1}{1,46}}} = 1898,88$$

$$\hat{\theta}_2 = \frac{T_i}{n_2^{\frac{1}{\beta}}}$$

$$\hat{\theta}_2 = \frac{12100}{7^{\frac{1}{1,46}}} = 3191,18$$

Lampiran 4A.Perhitungan Nilai ROCOF Mesin KCC

$$w(t) = \frac{\beta}{\theta_1} \left(\frac{t}{\theta_1} \right)^{\beta-1} = 0,000769 \left(\frac{t}{1898,88} \right)^{0,46}$$

T	ROCOF KCC	T	ROCOF KCC	T	ROCOF KCC
1000	0.000572	1029	0.00058	1058	0.000588
1001	0.000573	1030	0.00058	1059	0.000588
1002	0.000573	1031	0.000581	1060	0.000588
1003	0.000573	1032	0.000581	1061	0.000588
1004	0.000574	1033	0.000581	1062	0.000589
1005	0.000574	1034	0.000581	1063	0.000589
1006	0.000574	1035	0.000582	1064	0.000589
1007	0.000574	1036	0.000582	1065	0.000589
1008	0.000575	1037	0.000582	1066	0.00059
1009	0.000575	1038	0.000582	1067	0.00059
1010	0.000575	1039	0.000583	1068	0.00059
1011	0.000575	1040	0.000583	1069	0.00059
1012	0.000576	1041	0.000583	1070	0.000591
1013	0.000576	1042	0.000583	1071	0.000591
1014	0.000576	1043	0.000584	1072	0.000591
1015	0.000576	1044	0.000584	1073	0.000591
1016	0.000577	1045	0.000584	1074	0.000592
1017	0.000577	1046	0.000584	1075	0.000592
1018	0.000577	1047	0.000585	1076	0.000592
1019	0.000577	1048	0.000585	1077	0.000592
1020	0.000578	1049	0.000585	1078	0.000593
1021	0.000578	1050	0.000585	1079	0.000593
1022	0.000578	1051	0.000586	1080	0.000593
1023	0.000578	1052	0.000586	1081	0.000593
1024	0.000579	1053	0.000586	1082	0.000594
1025	0.000579	1054	0.000586	1083	0.000594
1026	0.000579	1055	0.000587	.	.
1027	0.00058	1056	0.000587	.	.
1028	0.00058	1057	0.000587	.	.

Lampiran 4B. Perhitungan Nilai ROCOF Mesin FCB

$$w(t) = \frac{\beta}{\theta_2} \left(\frac{t}{\theta_2} \right)^{\beta-1} = 0,000457 \left(\frac{t}{3191,18} \right)^{0,46}$$

T	ROCOF FCB	T	ROCOF FCB	T	ROCOF FCB
1000	0.000268	1029	0.000272	1058	0.000275
1001	0.000268	1030	0.000272	1059	0.000275
1002	0.000269	1031	0.000272	1060	0.000276
1003	0.000269	1032	0.000272	1061	0.000276
1004	0.000269	1033	0.000272	1062	0.000276
1005	0.000269	1034	0.000272	1063	0.000276
1006	0.000269	1035	0.000273	1064	0.000276
1007	0.000269	1036	0.000273	1065	0.000276
1008	0.000269	1037	0.000273	1066	0.000276
1009	0.000269	1038	0.000273	1067	0.000276
1010	0.00027	1039	0.000273	1068	0.000277
1011	0.00027	1040	0.000273	1069	0.000277
1012	0.00027	1041	0.000273	1070	0.000277
1013	0.00027	1042	0.000273	1071	0.000277
1014	0.00027	1043	0.000274	1072	0.000277
1015	0.00027	1044	0.000274	1073	0.000277
1016	0.00027	1045	0.000274	1074	0.000277
1017	0.00027	1046	0.000274	1075	0.000277
1018	0.00027	1047	0.000274	1076	0.000277
1019	0.000271	1048	0.000274	1077	0.000278
1020	0.000271	1049	0.000274	1078	0.000278
1021	0.000271	1050	0.000274	1079	0.000278
1022	0.000271	1051	0.000274	1080	0.000278
1023	0.000271	1052	0.000275	1081	0.000278
1024	0.000271	1053	0.000275	1082	0.000278
1025	0.000271	1054	0.000275	1083	0.000278
1026	0.000271	1055	0.000275	.	.
1027	0.000272	1056	0.000275	.	.
1028	0.000272	1057	0.000275	.	.

Lampiran 5A. Rincian Biaya Perawatan (C_p) dan Biaya Akibat Kerusakan (C_f)

a. Biaya Perawatan (C_p)

Satuan	C_p
Per Musim tidak Giling (6 Bulan)	1.817.162.450
per hari (180 hari)	10.095.346,94
Per jam Operasi	420.639,456

b. Biaya Akibat Kerusakan (C_f)

Satuan	Pergantian Alat
Per Musim Giling (6 Bulan)	605.720.816
per hari (180 hari)	3.365.115,644
Per jam Operasi	140.213,1519

Kerugian Berhenti Produksi	
Target Produksi (Ton/Hari)	2700
Produksi Tercapai (Ton/Hari)	1837
Lost Product (Ton/Hari)	863
Lost Product (kg/Hari)	863000
Lost Product (kg/jam)	35958.33333
Harga per kg gula	539.375.000
Rp 15000	

Sehingga, C_f adalah

Pergantian Alat	140.213,15
Kerugian Berhenti Produksi	539.375.000
Total (C_f)	539.515.213

Lampiran6B.Syntax MATLAB Optimasi Biaya

```

clc;
clear;
Lambda=input('Lambda=');
Beta=input('Beta=');
Cf=input('Cf=');
Cp=input('Cp=');
N=1:1:4;
T=1:1:15000;
Tl=length(T);
Nl=length(N);
for a=1:Tl
    t=T(a);
    n=N;
    Rt=(t/Lambda).^Beta;
    at=0;
    for i=0:(N-1)
        at=at+((N-i)*((Rt^i)/factorial(i))*exp(-1*Rt));
        q=0;
        c=0;
        h=(t-0)/1000;
    Luas=0;
    for p=1:(1000-1)
        bw=0;
        ba=(((c/Lambda).^Beta)^i)./factorial(i))*exp(-(c/Lambda).^Beta);
        d=c+h;
        bb=(((d/Lambda).^Beta)^i)./factorial(i))*exp(-(d/Lambda).^Beta);
        Luas=Luas+(0.5*(ba+bb)*h);
        c=d;
    end
    bw=bw+Luas;
end
C(a,N)=((Cf*(n-at))+Cp)/bw
end
mesh(C)

```

Lampiran 6C.Perhitungan Optimasi Biaya Mesin KCC

T	N			
	1	2	3	4
1	429890.7	438718	447545.4	456372.8
2	222676.5	234818.9	246961.2	259103.6
3	154990.2	169622.2	184254.2	198886.2
4	121972.6	138674.9	155377.1	172079.3
5	102725.6	121233.2	139740.9	158248.5
.
.
.
24	55632.99	93709.74	131786.5	169863.2
25	55652.84	94450.97	133249.1	172047.2
26	55711.21	95215.28	134719.3	174223.4
27	55803.02	95998.48	136193.9	176389.4
28	55923.95	96797.08	137670.2	178543.3
29	56070.3	97608.13	139145.9	180683.8
30	56238.93	98429.15	140619.4	182809.6
.
.
.
14995	313891	627537.4	941183.8	1254830
14996	313891	627537.4	941183.8	1254830
14997	313891	627537.4	941183.8	1254830
14998	313891	627537.4	941183.8	1254830
14999	313891	627537.4	941183.8	1254830
15000	313891	627537.4	941183.8	1254830

Lampiran 6C. Perhitungan Optimasi Biaya Mesin FCB

T	N			
	1	2	3	4
1	425198.7	429335.5	433472.4	437609.2
2	216222.5	221912.8	227603.2	233293.6
3	147212.8	154070	160927.1	167784.3
4	113095	120922.3	128749.6	136577
5	92888.31	101561.8	110235.2	118908.7
.
.
.
40	33104.54	55675.43	78246.31	100817.2
41	33105.58	55934.17	78762.76	101591.3
42	33115.47	56198.38	79281.3	102364.2
43	33133.47	56467.46	79801.44	103135.4
44	33158.93	56740.85	80322.76	103904.7
45	33191.25	57018.07	80844.88	104671.7
.
.
.
14995	186769.5	373393.5	560017.5	746641.5
14996	186769.5	373393.5	560017.5	746641.5
14997	186769.5	373393.5	560017.5	746641.6
14998	186769.5	373393.6	560017.6	746641.6
14999	186769.5	373393.6	560017.6	746641.6
15000	186769.5	373393.6	560017.6	746641.6

Lampiran 7A. Surat Pernyataan Izin Publikasi**SURAT PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menerangkan bahwa:

Nama : Ifa Faulina
NRP : 1315 105 033

Berdasarkan Nomor Surat 025/Rupa2/SDM/2017, telah benar-benar mengambil data dari perusahaan yang terkait. Perusahaan merasa keberatan jika nama perusahaan dicantumkan dalam Tugas Akhir mahasiswa serta dipublikasikan dalam E-Journal ITS. Namun, perusahaan mengizinkan data yang digunakan dicantumkan dalam Tugas Akhir mahasiswa.

Surabaya, 20 Juli 2017

Dosen Pembimbing



(Dr. Muhammad Mashuri, MT)

NIP. 19620408 198701 1 001

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Ifa Faulina, lahir di Kota Surabaya pada tanggal 02 April 1994. Ifa adalah panggilan akrab penulis yang merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Alm. Tukiban dan Ibu Atim. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN Medokan Ayu II/615 selama 6 tahun. Dilanjutkan di bangku sekolah menengah pertama di SMP Negeri 17 Surabaya selama 3 tahun. Lulus bangku sekolah menengah pertama, penulis melanjutkan sekolah menengah atas di SMA Negeri 14 Surabaya selama 3 tahun. Pendidikan penulis dilanjutkan di bangku perkuliahan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya sebagai mahasiswi program studi Diploma III pada tahun 2012 dan menyelesaikan perkuliahan pada jangka waktu 3 tahun. Penulis melanjutkan pendidikan Lintas Jalur untuk mendapat gelar S1 dengan tugas akhir yang berjudul **“Penentuan Waktu Optimum Perbaikan Mesin Ketel Menggunakan Metode *Power Law Process* di PT. PG X Sidoarjo”**. Selama menjadi mahasiswi ITS, penulis aktif dalam kegiatan kepanitiaan di ITS diantaranya GERIGI, INTERN , dan penulis sempat menjadi salah satu staf pada organisasi *Professional Statistics* (PST). Saran dan kritik yang membangun sangat dibutuhkan penulis serta jika ingin mendiskusikan lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini penulis sangat berkenan. Penulis dapat dihubungi via email di ifa.faulina@gmail.com

(Halaman Ini Sengaja Dikosongi)